

복합재 적층판 강도저하에 대한 구멍가공 품질 특성화에 관한 연구

이정환* · 공창덕**

A Study on Characterization of Hole Quality Effect on Composite Laminate Strength Reduction

J. H. Lee* · C. D. Kong**

ABSTRACT

The main objectives of this research are to experimentally explain the drilling mechanism for the production of bad holes and good holes during the drilling operation, to investigate how a wide range of drilling parameter affect composite laminate strength reduction, and to find which type of test provides the greatest interrogation of notched composite laminates. To achieve these objectives, a bulk of test specimens have been drilled with 5 different drilling parameters and tested with compressive, tensile, and flexural loads. It was found that the drilling parameters had a measurable effect on specimen hole quality as measured by static strength. The specimens, which were well supported, which had the higher spindle speed and lower feed rate, and which were well clamped gave the best hole qualities. The flexural test results presented the most clear and consistent failure strengths relating to the drilling parameters and associated hole quality.

초 록

본 연구의 목적은 복합재 적층판의 드릴링작업시 양호한 구멍과 불량한 구멍의 제작에 관한 드릴링기술을 실험적으로 설명하며 복합재 적층판의 강도저하에 드릴링변수가 어떤 영향을 미치는지 조사하고 어떤 형태의 시험이 드릴링변수의 영향을 잘 보여주는지 알아보기 위한 것이다. 이를 위해 복합재 시편을 다섯가지 드릴링변수에 따라 드릴링작업하여 압축, 인장, 굽힘하중에 대한 실험을 수행하였다. 드릴링변수들이 시편의 구멍가공 품질에 중요한 영향을 미친다는 것을 알수 있었고 빠른 스픬들 회전속도, 낮은 이송율, 잘 고정된 상태에서 드릴작업이 된 시편이 우수한 구멍가공 품질을 보여주었다. 굽힘실험결과가

* Dept. of Aerospace Eng., Bristol University

** 조선대학교 항공우주학과 (Chosun University, Dept. of Aerospace Eng.)

구멍가공 품질에 대한 드릴링변수와 관련하여 가장 분명한 파괴강도를 보여주어 굽힘실험이 구멍 강도저하에 드릴링변수가 미치는 영향을 잘 나타내는 것을 알 수 있었다.

NOMENCLATURE

A	Drilling Parameter(9000rpm, 1000mm/min)
B	Drilling Parameter(9000rpm, 5000mm/min)
C	Drilling Parameter(10000rpm, 375mm/min)
D	Drilling Parameter(2500rpm, 92mm/min)
E	Drilling Parameter(2500rpm, 200mm/min)
σ_n	Notched Tensile Strength
P	Maximum Tensile Failure Load (N)
t	Thickness of the Specimen (mm)
w	Specimen Width
σ_o	Unnotched Tensile Strength
K _T	Strength Reduction Factor
σ_{x_k}	Layer stress at the outermost Oo layer "k"
σ'_{x_k}	Layer stress for unit loading intensity Nx
N _{x_r}	Loading intensity value obtained from test results
σ_{max}	Flexural Failure Stress
P	Flexural Load
L	Length of Support Span
b	Flexural Specimen Width
d	Flexural Specimen Thickness
ϵ_{max}	Flexural Failure Strain
D	Max. Deflection of the Centre of the Specimen
M _{x_r}	Moment intensity value obtained from test results
K _X	Mid plate curvature
z	Half of the laminate thickness
K' _x	Unit mid plain curvature obained from unit MX
M _{x_r}	Moment intensity derived from test

RESULTS

l 1/3 total four point bending span(i.e. inner span)

ABBREVIATION

AITM	Airbus Industrie Test Method
ASTM	American Standard Test Method
LVDT	Linear Variable Displacement Transducer

1. 서 론

경량화 설계가 중요시되는 항공우주산업에서 요구된 우수한 복합재료 제조의 필요성은 계속 증대되고 있다. 이러한 필요의 주된 목적은 복합재료의 낮은 중량비를 이용한 성능개선과 특히 고강도, 고탄성을 이용한 피로성능개선을 하는데 있다. 그러나 이방성, 비균질, 마모성 때문에 복합재료를 기계가공 하는데 어려움을 겪고 있다. 드릴링은 구조물에 있어서 부품의 기계적인 조립의 필요성 때문에 빈번히 행해지는 기계가공으로서 복합재료 드릴링 작업시 발생하는 충간분리현상(delamination)은 중요한 문제중의 하나이다. 이러한 충간분리현상은 드릴가공 초기의 표피가공력(peeling force), 드릴가공 끝시기의 미는 힘(pushng force), 드릴링 작업시 섬유와 매트릭스 조각의 배출, 매트릭스의 과열 등으로 인해 발생하게된다^{1,2)}. 충간분리현상은 복합재 적층판의 강도와 강성 및 하중에 견디는 능력을 감소시키기 때문에 특히 압축, 전단, 피로하중을 받으면서 습기 등 극한 환경에 장기간 노출될 때 복합재료의 구조적인 용용에 제한요소가 된다.

충간분리가 일어나지 않는 드릴링에 대해서 이론적, 실험적 연구가 수행되어졌고 복합재 구멍에 대한 많은 연구가 수행되어졌으나 충간분리가 일어나

지 않는 드릴링과 결합용 패스너 구멍결합의 영향에만 관심을 두었고 다른 드릴링변수를 갖는 양호한 구멍과 불량한 구멍에 의해 평가되는 복합재 적층판의 강도저하에 대한 구멍가공 품질 효과에 대한 연구결과는 거의 알려지지 않았다^{3)~13)}.

특히 최근 복합재의 개발은 두꺼운 적층판(5mm 이상)의 사용을 포함하고 있으나 이에 대한 노치(notch) 적층판의 거동은 비교적 알려져있지 않다. 본 연구의 주된 목적은 드릴링작업동안 양호한 구멍과 불량한 구멍의 가공에 대한 드릴링기술을 실험적으로 설명하고 어떤 형태의 시험이 노치 복합재 적층판에 대한 드릴링변수의 영향을 적절하게 보여주는지 알아내며, 어떤 형태의 드릴링변수가 복합재 적층판의 강도 저하에 영향을 미치는지 조사하는 것이다. 이러한 목적을 성취하기 위해서 많은 양의 시편이 다섯가지 드릴링변수로 드릴링되었고 압축, 인장, 굽힘하중에 대해 실험되었다. 본 연구에서는 복합재의 미세한 기계적 손상보다는 거시적인 기계적 강도에 의한 드릴링 특성에 초점을 맞추었다. 특히 두꺼운 노치 시편의 굽힘시험에 수행되었는데, 그 이유는 시험시편의 준비가 용이하고 크기가 작아도 되며 시험시편을 고정하기위해 그립이 필요하지 않은 장점이 있기 때문이다¹⁴⁾. 또한 굽힘시험은 시험동안 어느 면이 인장과 압축이 작용하는지 드릴입구면의 손상과 드릴출구면의 손상을 알 수 있는 장점이 있다. 비교적 이 실험은 구멍가공 성능비교에 매우 유용하며 각 적층판 층의 응력에 의한 시험성능을 고려하면 노치강도의 저하 설계 자료로서 이용 가능하다.

2. 실험절차

2.1 재료

본 연구에서 사용된 소재는 AS4/8552로서 HEXCEL 8552 애폭시 수지에 고강도의 일방향 연속 카본섬유 AS4를 합침시킨 폴리프레그이며, 사용 전 수지의 변질을 막기 위하여 냉장상태로 보관되었다. AS4/8552의 적층탄성 물성치는 Table 1과 같다.

재료는 400mm × 400mm 판으로 적층되었고 적

Table 1. Lamina Elastic Properties of AS 4/8552

Ply Thickness (mm)	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
0.25	135	9.5	4.9	0.3
Longitudinal Tensile Strength(MPa)		Transverse Tensile Strength(MPa)		
1,680		61		

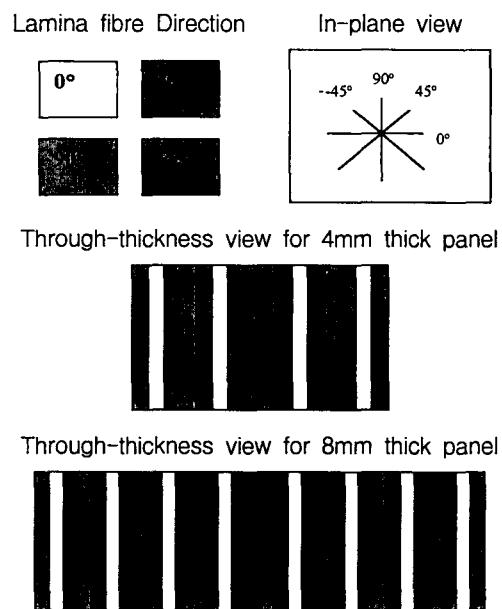


Fig. 1. Stacking Sequences for 4mm and 8mm Laminates for X-directional Layup

층판의 적층순서는 Fig. 1과 같이 $[(45/0/-45/90)_2]_s$ 와 $[(45/0/-45/90)_4]_s$ 이며 각각 4mm와 8mm 두께의 패널에 대하여 AIMT에 일치하게 준동방성 평면내 물성치(in-plane property)를 보여준다^{15),16)}. 재료의 효율적인 이용을 위해 시편을 X와 Y방향으로 패널로 부터 잘라냈다. Y방향 시편은 효과적으로 다른 적층순서를 갖는다. 즉 0° , 90° 층과 $+45^\circ$, -45° 층의 방향이 반대이다. 그러므로 X와 Y방향시편은 다른 적층순서로 인하여 다른 물성의 적층판이 된다. 특히 압축과 굽힘시험을 위해 표면 가까이 있는 0° 에서 90° 층의 변화가 중요하다.

2.2 제조

패널은 4층(45/0/-45/90) 적층마다 진공압착 되었고 한층의 두께는 0.25mm이다. 진공백 몰딩(vacuum bag moulding) 공법을 이용하여 두께 4mm 패널 8개와 두께 8mm 패널 4개가 오토크레이브(auto clave)에서 제조되었다. 적층판은 180°C에서 2시간동안 경화되었다. 본 연구를 위해 사용된 경화사이클선도는 Fig. 2와 같다. 12개의 복합재 패널을 시편으로 만들기전에 제작과정중의 결함을 탐지하기 위해 초음파로 C-scan 하였다.

2.3 드릴링

본 연구에서는 압축, 인장, 굽힘시험과 같은 정적 시험하에서 구멍가공 품질효과를 조사하기위해 다섯 개의 다른 가공조건을 적용하였다. 드릴링변수는 1) 배면지지(back support), 2)스핀들 회전속도변화, 3)이송율변화, 4)고정여부, 5)가공질 등이다. 드릴링은 수치제어(NC) 가공기계를 이용하여 CCT(composite cutting technology)방법에 의해 수행되었다. 배면지지 드릴링변수 A, B 경우는 출구면을 지지하였고 C, D, E 경우는 지지하지 않았다. 다섯가지 드릴링변수는 Table 2와 같다. 본 연구에서 사용된 드릴 직경은 6.35mm로 Ballnose Tungsten Carbide 드릴이 사용되었다. 또한 드릴링 작업동안의 배면지지와 고정효과를 조사하기 위해 몇 개의 구멍은 400mm × 400mm 패널에 드릴링되었다(stage 1). 인장시편은 38.1mm × 280mm, 압축시편은 38.1mm × 150mm, 굽힘시편은 39mm × 120mm, 39mm × 235mm을 사용하여 204개시편중 166개 시편에 구멍이 가공되었고 38개는 가공하지 않았다(stage 2). Figure 3은 드릴링 변수에 따라 가공한 시편의 비파괴검사 사진이다.

2.4 실험방법

인장, 압축시험은 British Aerospace에서 AITM 절차에 따라 Zwick 1484 인장시험기에서 수행되었고 하중, cross head 변위측정과 변위제어 상태에서 서보로 제어하는 유압장치로 인장과 압축하중이 가해졌다. 4mm 두께의 Y방향 시편의 인장시험은 2mm/min의 일정율의 cross head 속도와 고정압력 300bar에서 수행되었다. 4mm, 8mm두께 X방향

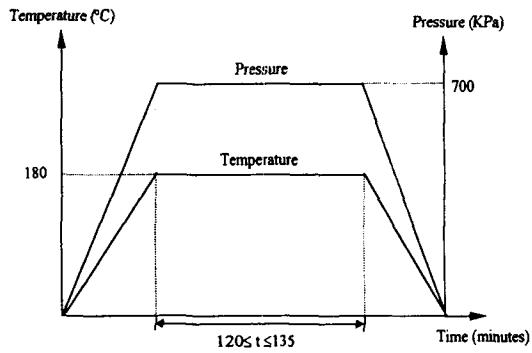


Fig. 2. Cure Process Diagram

Table 2. Drilling Parameters

Drilling Parameter Set	A	B	C	D	E
Back Support	○	○	×	×	×
Spindle Speed (rpm)	9000	9000	10000	2500	2500
Feed Rate (mm/min)	1000	5000	375	92	200
Clamping	Stiff (stage2)	Stiff (stage2)	Flexible (stage1)	Flexible (stage1)	Flexible (stage2)
Hole Quality	Good Hole (Acceptable)			Bad Hole (Unacceptable)	

(Note : A→E = Good to Bad)

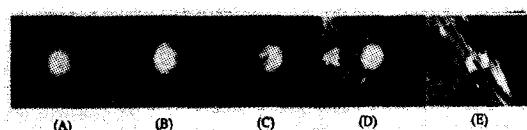


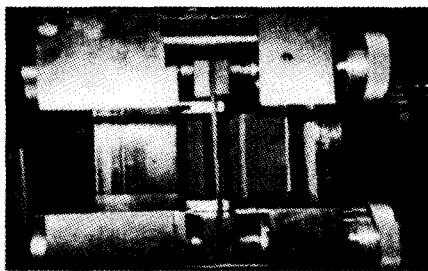
Fig. 3. Photographs of Hole Exit Side Damage detected by X-ray Non-destructive Inspection

시편의 압축시험은 0.5mm/min의 일정율의 cross head 속도와 고정압력 200bar에서 수행되었다.

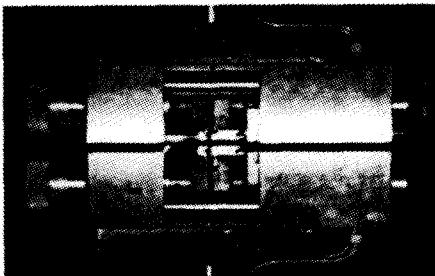
굽힘시험은 2.5mm/min의 일정한 cross head 변위에서 Instron Model 1342 만능시험기를 이용하여 ASTM표준을 따라 수행되었으나 길이, 깊이,

폭의 치수가 시편의 확실한 설치를 위해 조정됨에 따라 비표준시험이 되었다¹⁷⁾. LVDT가 하중점 (loading nose) 사이의 흐름을 측정하기 위해 사용되었고, 하중점에 의한 응력집중 때문에 과도한 움푹파임 (indentation)과 파괴를 피하기 위해 롤러직경을 다르게하여 4mm 두께 시편은 10mm의 롤러직경, 8mm두께 시편은 20mm의 롤러직경을 사용하였다. 4mm 두께 시편은 드릴 입구와 출구면의 인장에 대한 굽힘시험을 수행하였고 8mm두께 시편은 드릴 입구면의 인장에 대해서만 굽힘시험을 수행했다. Fig. 4는 인장, 압축 및 굽힘시험 장치를 보여준다.

- Tension Test



- Compression Test



- Flexural Test with LVDT

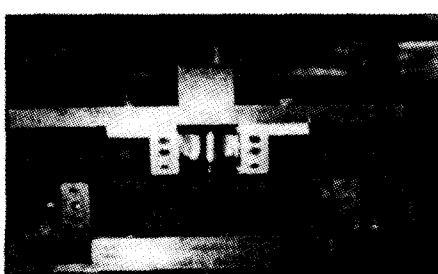


Fig. 4. Photographs of Test Facilities

3. 실험결과계산

3.1 인장시험

동가 등방성 응력값은 AITM 계산절차를 이용하였고, 층의 응력치는 고전 적층판 이론을 기초로 계산하여 OHT(open hole tension)시험결과와 시편의 시험결과를 처리하였다¹⁸⁾.

3.1.1 AITM 등가 등방성 응력결과 처리

- 노치시편

$$\sigma_n = P/(t \times w_n) \text{ (MPa)} \quad (1)$$

- 노치없는 시편

$$\sigma_o = P/(t \times w_o) \text{ (MPa)} \quad (2)$$

여기서,

P : 인장파괴하중 (N)

w : 시편폭 (mm)

t : 시편두께 (mm)

강도저하계수(K_T)

$$K_T = \frac{\sigma_n}{\sigma_o} \quad (3)$$

3.1.2 각각의 층의 응력계산

가장 바깥쪽 0° 층의 값은 마지막 파괴에 대한 기준으로 사용된다.

$$\sigma_{x_k} = \sigma'_{x_k} \times \frac{N_{x_T}}{l} \quad (4)$$

여기서,

σ_{x_k} : 가장 바깥쪽 0° 층 "k"에서 층응력

σ'_{x_k} : 적층판 해석에서 얻어진 단위 하중 강도

N_{x_T} 에 대한 층응력

N_{x_T} : 시편의 하중강도

$$N_{x_T} = \frac{F}{w} \text{ (N/mm)}$$

F : 최대 파괴하중

노치가 있거나 없는 경우의 응력은 적절한 하중강도 N_{x_r} 과 $N_{x_{r_0}}$, 및 강도저하계수 K_T 를 이용하여 구해진다.

3.2 압축시험

인장시험의 경우와 같이 OHC(open hole compression) 시험결과와 시편 시험결과의 처리는 AITM 계산방법과 고전 적층판 이론을 이용하였다. 인장대신 압축응력을 사용하는 것을 제외하면 OHT 경우와 같다.

3.3 굽힘시험

굽힘시험결과는 파괴에 효과적인 굽힘응력과 변형값을 얻기위해 처리되었다. 등가 등방성 응력치에 대해 ASTM 계산절차를 기초로 하였고 바깥쪽 0° 층 값에 대해 고전 적층판 이론을 이용했다.

3.3.1 ASTM 등가등방성 결과계산

- 굽힘강도

노치 굽힘강도와 노치없는 경우의 굽힘강도는 전체단면에 기초한 최대 등가 등방성 섬유응력, 즉 σ_n , $\sigma_o = \sigma_{\max}$ 로 계산된다.

$$\sigma_{\max} = \frac{PL}{wt^2} \quad (5)$$

여기서,

σ_{\max} : 최대 섬유응력

P : 굽힘 파괴하중

L : 지지폭의 길이

w : 시편폭

t : 시편두께

강도저하계수(K_T)는 (3)식으로 계산된다.

- 굽힘파괴변형

$$\varepsilon_{\max} = \frac{4.70Dt}{L^2} \quad (6)$$

여기서,

ε_{\max} : 최대섬유변형

D : 시편중앙의 최대변위

t : 시편두께

L : 지지폭의 길이

3.3.2 각각의 층의 응력계산

가장 바깥쪽 0° 층의 값은 마지막 파괴에 대한 기준으로 사용된다.

$$\sigma_{x_k} = \sigma'_{x_k} \times \frac{M_{x_r}}{l} \quad (7)$$

여기서,

σ_{x_k} : 가장 바깥쪽 0° 층 "k"에서 층응력

σ'_{x_k} : 적층판 해석에서 얻어진 단위 하중 강도 N_x 에 대한 층응력

M_{x_r} : 시편의 모멘트 강도

P : 최대 파괴하중

$$M_{x_r} = \frac{PL/6}{w} \text{ (N/mm)}$$

노치가 있거나 없는 경우의 응력은 적절한 하중강도 M_{x_r} 과 $M_{x_{r_0}}$, 및 강도저하계수 K_T 를 이용하여 구해진다.

3.3.3 굽힘변형

- 하중으로부터 계산

$$\varepsilon_x = K_x z \quad (8)$$

K_x : 중간면 판 곡률(mid plate curvature)

$z : t/2$, 적층판 두께의 절반

중간면 판 곡률은 다음과 같이 구한다.

$$K_x = K'_x \times \frac{M_{x_r}}{l} \quad (9)$$

K'_x : 단위 모멘트강도 M_x 작용시 적층판 해석

에서 얻어진 중간면 판 곡률

M_{x_r} : 시편의 모멘트강도

P : 최대 파괴하중

$$M_{x_r} = \frac{PL/6}{w} \quad (\text{N/mm})$$

- 변위로부터 계산

안쪽 하중점 사이에 변위값을 이용하는 것은 아래와 같이 계산된다.

$$\varepsilon = \frac{4\delta_i t}{l^2 + 4\delta_i} \quad (10)$$

여기서,

t : 적층판 두께

l : 4점 굽힘 폭의 1/3

이 식은 미소변위와 원호형 곡률변위의 가정하에 얻어진다.

4. 실험결과

4.1 배면 지지의 영향

Ho-cheng과 Dharan은 드릴링작업동안 복합재 적층판의 충간분리현상은 드릴 출구에서 이송율에 따른 미는 힘(pushing force)에 의한 것이라고 제시했다¹⁾. Table 4에서 보여지는 바와 같이 드릴 출구에서의 충간분리현상은 더 높은 이송율에서 발생했다.

본 연구에서 드릴링변수 C의 이송율(0.0375)은 Ho-cheng과 Dharan이 제시한 이송율(0.03)과 비슷하지만 충간분리현상은 발견되지 않았다. 드릴링 변수 A의 이송율(0.11mm/rev)은 Ho-cheng과 Dharan 실험에서 충간분리현상을 발생시킨 이송율(0.05mm/rev) 보다 훨씬 높다(Table 4). 그러나 드릴 출구에 배면지지가 사용되었으므로 충간분리현상이 발생되지 않았다. 이것은 배면지지가 충간분리 현상에 영향을 주는 드릴링의 중요한 요소 중 하나임을 보여준다. Fig. 5는 드릴링조건 A와 C(Table 3참조)의 드릴 출구 사진이다.

Table 3. Drilling Parameters

Drilling Parameter	A	C
Spindle Speed	9000 rpm	10000 rpm
Feed Rate	0.11mm/rev	0.0375mm/rev
Back Support	○	×

Table 4. Drilling Parameters of Ho-cheng and Dharan (Without Back Support)

Spindle Speed	3700 rpm	
Feed Rate	0.05mm/rev	0.03mm/rev
Delamination	○	×

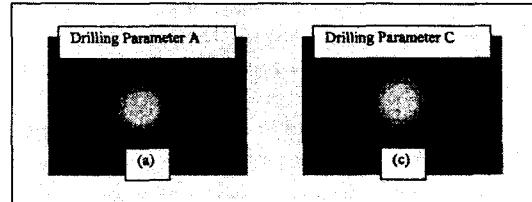


Fig. 5. Photographs of Exit Hole Drilled by Drilling Parameter A and C

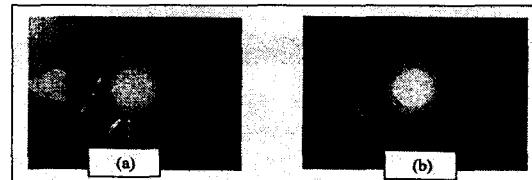


Fig. 6. Photograph of Drill-exit Holes of 400×400mm(a), 39×120mm(b) Specimens Drilled with Drilling Parameter Set D

4.2 고정 정도의 영향

본 연구에서 400mm×400mm패널과 39mm×120mm시편에 드릴링변수 D(Table 2참조)를 이용하여 시험하였다. 400mm×400mm패널에 드릴링을 하였을 때 패널의 변위로 인해 드릴 출구면에 심한 손상이 발생했고 39mm×120mm시편은 더 단단히 고정되었기 때문에 손상이 발생하지 않았다. Fig. 6은 드릴링변수 D에서의 드릴 출구 사진이다. 드릴링 동안 시편의 고정이 충간분리현상에 영향을 적게 준

다는 것을 알 수 있다. 시편변위에 의한 층간분리현상을 피하기 위해 배면지지가 적용되거나 시편의 적절한 고정이 되어야 함을 보여준다.

4.3 인장시험

드릴작업이 드릴링변수 C, D, E에서 이루어진 두께 4mm의 Y방향 시편과 드릴링작업을 하지않은 시편이 인장시험에 사용되었다. 모든 시편의 파괴는 구멍부 재료의 불연속에 의한 응력집중의 결과로 구멍에서 일어났다.

Table 5는 계산된 응력값을 보인 것이다. 구멍가공의 질에 따른 강도저하계수의 차이가 각 드릴링변수의 강도저하계수 표준편차보다 작아 인장시험은 드릴링변수의 영향을 뚜렷하게 보여주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 드릴작업된 시편의 파괴가 구멍의 중심과 하중방향에 수직하게 발생함을 보여준다. 드릴작업을 하지않은 시편의 경우 파괴가 시편의 고정탭부분에 일어남을 알 수 있다.

4.4 압축시험

4mm, 8mm두께의 X방향 시편이 시험되었고 주로 섬유의 좌굴과 비틀림에 의해 파괴가 일어났다.

Table 5. Experimental Values for Tension Tests

4mm Y Directional Tension Test Results (Unit : MPa)				
Drilling Parameter	C	D	E	Plain Specimen
Hole Quality	Good	Bad		
AITM-Tensile Strength	343	346	339	650
Outer 0° Layer Stress	900.2	900.7	895.7	1677.8
Strength Reduction Factor	0.531	0.532	0.522	1.0
Standard Deviation	0.02	0.0094	0.0258	

모든 시편이 하중축에 거의 수직한 방향으로 구멍에서 파괴가 일어났다. Fig. 8에서 보여지는 바와 같이 파괴가 드릴 입구와 출구면에서 동시에 파괴가 발생하였다. 시편의 평균실험압축강도를 Table 6에 보였다.

4.5 굽힘시험

4.5.1 4mm와 8mm 두께 X방향 시편

드릴구멍이 있는 시편의 초기 파괴는 구멍주위에서 시작하여 하중축에 거의 수직한 방향으로 진전되었고, 마지막 파괴는 인장에서 뚜렷하게 일어났다. 드릴작업을 하지않은 시편의 경우 인장면에서 파괴가 일어났다. Table 7은 X방향 굽힘시편의 실험파괴 평균값을 보인 것이다. Fig. 9는 두께 8mm X방향 시편의 굽힘시험 결과이다.

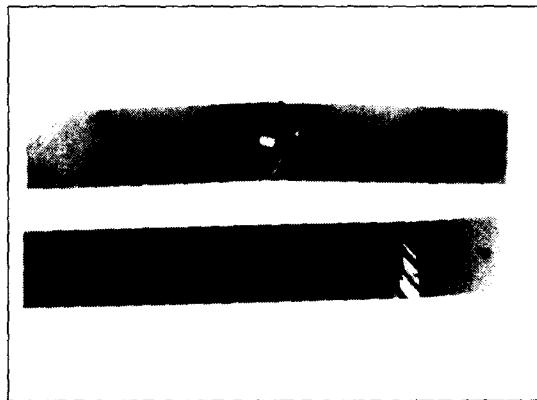


Fig. 7. Photographs of Tensile Specimens Tested with and without Hole

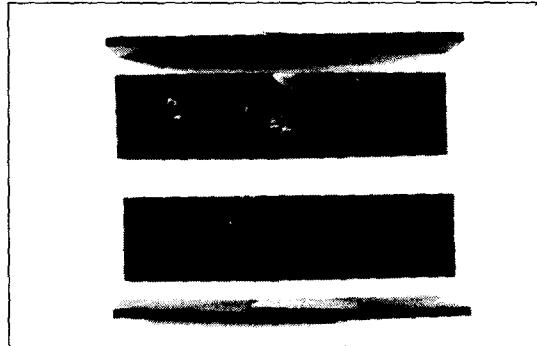


Fig. 8. Photograph of 4mm Thick X-directional Specimens Tested in Compression

Table 6. Experimental Values for Compression Tests

4mm X Directional Compression Test Results (Unit : MPa)				
Drilling Parameter	C	D	E	Plain Specimen
Hole Quality	Good	Bad		
AITM-Compressive Strength	309	292	306	377
Outer 0° Layer Stress	806.2	762.3	803.08	981.8
Strength Reduction Factor	0.82	0.78	0.818	1.0
Standard Deviation	0.016	0.04	0.04	
8mm X Directional Compression Test Results (Unit : MPa)				
Drilling Parameter	A	B	E	Plain Specimen
Hole Quality	Good	Bad		
AITM-Compressive Strength	336	339	327	439
Outer 0° Layer Stress	873.8	877.8	830.8	1140.5
Strength Reduction Factor	0.76	0.77	0.72	1.0
Standard Deviation	0.022	0.016	0.024	

4.5.2 4mm와 8mm 두께 Y방향 시편

X방향 시편과 마찬가지로 드릴구멍이 있는 Y방향 시편의 경우 양면에서 뚜렷한 파괴가 일어났고 드릴구멍이 없는 시편의 경우 인장면에만 파괴가 일어났다. Table 8은 Y방향 굽힘시편의 실험 파괴평균값을 보인 것이다. Fig. 10은 두께 8mm Y방향 시편의 굽힘시험 결과 사진이다.

Table 7. Experimental Mean Value of First and Final Failure for 4mm and 8mm Thick X Directional Specimens

4mm X Directional Flexural Test Results (Unit : MPa)					
Drilling Parameter	A	B	C	D	E
Hole Quality	Good			Bad	
Tension Side					
ASTM-1 st Failure	576	570	529	499	563
ASTM-Final Failure	625	597	567	551	593
Outer 0° Layer Stress	1342.6	1268.5	1259.5	1192	1225
Strength Reduction Factor	0.71	0.67	0.66	0.63	0.65
Standard Deviation	0.058	0.074	0.047	0.036	0.041
Tension Side					
ASTM-1 st Failure	555	546			513
ASTM-Final Failure	586	572			551
Outer 0° Layer Stress	1233.8	1202.8			1175.7
Strength Reduction Factor	0.65	0.64			0.62
Standard Deviation	0.054	0.023			0.038
8mm X Directional Flexural Test Results (Unit : MPa)					
Tension Side					
ASTM-1 st Failure	541	489			461
ASTM-Final Failure	550	537			492
Outer 0° Layer Stress	1296	1275			1157.4
Strength Reduction Factor	0.69	0.68			0.60
Standard Deviation	0.021	0.02			0.023

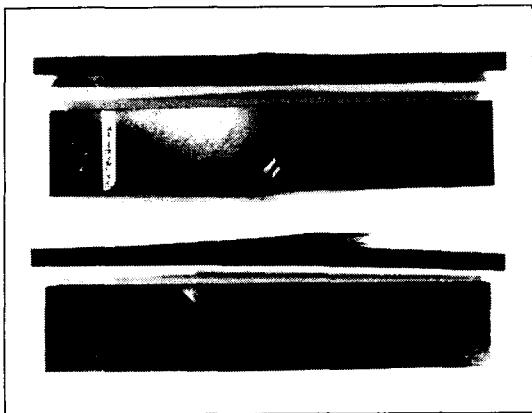


Fig. 9. Photographs of 8mm Thick X-directional Specimens Test

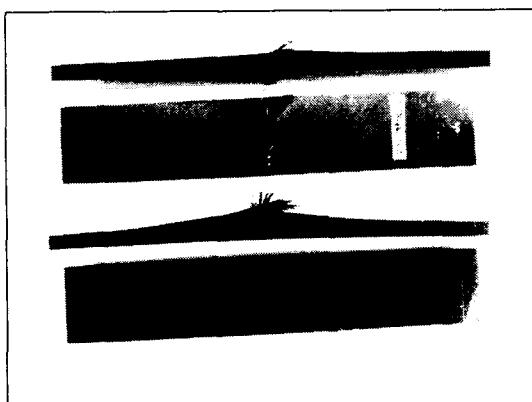


Fig. 10. Photograph of 8mm Thick Y-directional Specimens Test

5. 결 론

본 연구는 다섯가지의 다른 드릴링변수를 이용하여 인장, 압축, 굽힘 등 세종류의 정직시험을 수행하였다. 드릴링 작업을 할 때 배면지지, 스판들 회전속도, 이송율, 고정여부 등의 드릴링변수는 실험적 정직강도에 의해 판단해 보면 구멍가공 품질에 적지 않은 영향을주는 것을 알 수 있었다. 시편의 확실한 지지 및 고정, 빼른 스판들 회전속도, 낮은 이송율로 가공된 시편은 우수한 구멍가공 품질을 제공했다. 특히 드릴작업시의 배면지지와 고정은 양호한 구멍을 만드는데 중요한 요소임을 알 수 있었다. 드릴링 변수에 따른 복합재 적층판의 강도저하를 조사하기

Table 8. Experimental Mean Value of First and Final Failure for 4mm and 8mm Thick Y Directional Specimens

4mm Y Directional Flexural Test Results (Unit : MPa)						
Drilling Parameter	A	B	C	D	E	Plain Specimen
Hole Quality	Good				Bad	
Tension Side	1292.3	1272	1212.1		1207.3	1510.6
ASTM-Final Failure	558	554	533		529	643
Outer 0° Layer Stress	0.86	0.84	0.80		0.80	1.0
Strength Reduction Factor	0.022	0.018	0.026		0.027	1.0
Standard Deviation	---	---	---	---	---	---
Tension Side	538	545	561			643
ASTM-Final Failure	1235.3	1242.7	1277.4			1510.6
Outer 0° Layer Stress	0.82	0.71	0.85			1.0
Strength Reduction Factor	0.035	0.03	0.028			0.021
8mm Y Directional Flexural Test Results (Unit : MPa)						
Tension Side	482	439			475	649
ASTM-Final Failure	1104	1007.3			1065.6	1415.3
Outer 0° Layer Stress	0.78	0.71			0.75	1.0
Strength Reduction Factor	0.015	0.056				
Standard Deviation	---	---	---	---	---	---

Table 9. Comparison groups according to the drilling parameters

Comparison	Drilling Parameter
Feed Rate (mm/min)	A ₂ (1000) ↔ B ₂ (5000)
Support/ No Support	A ₂ (Support) ↔ C ₁ (No Support)
Spindle Speed(rpm)	C ₁ (9000) ↔ D ₁ (2500)
Flexible Restraint/ Stiff Restraint	D ₁ (Flexible) ↔ E ₂ (Stiff)

(Note : Subscript 1 = Stage 1,
Subscript 2 = Stage 2)

위해 Table 9와 같이 이송율비교(A-B), 지지상태와 비지지상태의 비교(A-C), 스플.EventQueue속도의 비교(C-D), 고정상태비교(D-E) 등 네가지 다른 비교그룹을 사용하였다. 비교결과 인장시험은 제작된 구멍가공 품질에 따라서 드릴링조건이 시편의 강도저하에 적은 영향을 주는 것으로 나타났고, 양호한 구멍과 불량한 구멍의 시편사이의 강도차이는 매우 작았다.

압축시험의 경우 구멍가공 품질과 그에 따른 정적강도에 있어서 드릴링변수의 영향은 뚜렷하지만 비교적 제한된 영향을 주고 불량한 구멍이 양호한 구멍에 비해 낮은 강도를 지님을 보였다.

굽힘시험결과가 구멍가공 품질에 따른 파괴강도의 차이를 잘 보여주었다. 일반적으로 양호한 구멍 시편의 파괴값은 불량한 구멍 시편보다 높았다. 또한 굽힘시험에 사용된 시편은 압축과 인장시험에 사용된 시편에 비하여 높은 강도를 보였다. 이것은 굽힘시험에서 시편의 안쪽 층의 낮은 변형에 기인하는 것으로 보여진다. 초기파괴강도와 완전파괴강도는 양호한 구멍이 더 높게 나타났으며 드릴입구면의 인장파괴강도가 드릴출구면 보다 높게 나타났다. Y방향시편이 X방향시편의 강도보다 낮게 나타났는데 이것은 Y방향적층판의 바깥층 중 0° 층이 90°로 바뀜에 따라 굽힘하중 담당능력이 떨어진다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 전체적으로 굽힘시험에 드릴링조건에 따라 노치가 있는 복합재 적층판의 파괴강도차이를 잘 나타내는 것으로 증명되었다. 굽힘시험

에서 압축이 걸리는 면과 인장이 걸리는 면에서 동시에 파괴가 시작되고 인장에서 완전파괴가 두드러지게 일어났다. 드릴 출구면이 입구면보다 인장강도가 낮았는데 이것은 드릴링 작업시 드릴 출구면의 손상이 더 크기 때문인 것으로 보여진다.

참 고 문 헌

1. H.Ho-Cheng and C.K.Dharan, "Delamination During Drilling in Composite Laminates", Transactions of the ASME, Vol. 112, August 1990, pp.236~239
2. Erik Persson, Ingvar Eriksson and Lief Zackrisson, "Effects of Hole Machining Defects on Strength and Fatigue Life of Composite Laminates", Composites, Part A, 1996, pp.141~151
3. T.L.Wong, S.Mu and G.M.Croy, "An Analysis of Delamination in Drilling Composite Materials", 14th National SAMPE Technology, Conf., Atlanta, GA., 1982, p.471
4. W.Koenig and P. Grass, "Quality Definition and Assessment in Drilling for Fibre Reinforced Thermosets", Annals of the (IRP 3812), 1989, pp.119~124
5. W.Koenig, P.Gass, C.Wulf and H.Willershied, "Machining of Fibre Reinforced Plastics", Annals of the CIRP, 34(2), 1985, pp.537~548
6. S.Jain and D.C.H.Yang, "Delamination-Free Drilling of Composite Laminates", Journal of Engineering for Industry, Vol. 116, Nov., 1994, pp.475~481,
7. Wen-Chon Chen, "Some Experimental Investigations in the Drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic (CFRP) Composite Laminates", International Journal of Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No.8, 1997, pp.1097~1108

8. Chung-Chen Tsao and Wen-Chou Chen, "Prediction of the Location of Delamination in the Drilling of Composite Laminate", *Journal of Materials Processing Technology*, 70, 1997, pp.185~187
9. Odom, E.M. and D.F.Adams, "Stiffness Reduction during Tensile Fatigue Testing of Graphite/Epoxy Angle-ply Laminates", Composite Materials Research Group, Department of Mechanical Engineering, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, 1982
10. Jamison, R.D. and K.L.Reifsneider, "Advanced Fatigue Damage Development in Graphite Epoxy Laminates", Virginia Polytechnique Institute and state University, Blacksburg, Virginia, 1982
11. Eriksson, I., "On the Bearing Strength of Bolted Graphite Epoxy Laminate", *Journal of Composite Materials*, 24(12), 1990 pp. 1246~1269
12. Pengra,J.J and R.E.Wood, "Influence of Hole Quality on Graphite Epoxy Composite Laminates", Collective Technical Paper, AIAA, ASME, AHS, 21st Structural Dynamics Materials Conference, AIAA Paper 80-077, 1980, pp.687~690
13. Andrews, S.D., O.O.Ochoa and S.D.Owens, "Influence of Manufacturing Defects on Fatigue Life of Composite Bolted Joints", ASME Special Symposium Volume of Presentations from the The ASME Winter Annual Meeting, 1991
14. W.K.Binienda, G.D.Roberts and D.S. Paradopoulos, "Effect of contact Stresses in Four-Point Bent Testing of Graphite/Epoxy and Graphite/PMR-15 Composite Beams", SAMPE Quarterly, 1992, pp.21~28
15. AIRBUS INDUSTRIE, "AITM (Airbus Industrie Test Method)", AITM 1,0007, Issue 2, June 1994
16. AIRBUS INDUSTRIE, "AITM (Airbus Industrie Test Method)", AITM 1,0008, Issue 2, June 1994
17. ANSI/ASTM D 790-71, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Plastics and Electrical Insulating Materials", Annual Books of ASTM Standards, Parts 35
18. Ian R. Farrow, "Lecture Notes for Composite Design", Bristol University, 1998